

СОСТАВ, КОНСТРУКЦИЯ И ТЕХНОЛОГИЯ ПОЛУЧЕНИЯ МАГНИТНОГО КЛИНА ДЛЯ АСИНХРОННЫХ ДВИГАТЕЛЕЙ МАЛОЙ И СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

Бекетов А.Р.¹, Баранов М.В.¹, Шустов И.Г.¹, Лыткин В.В.¹, Мойсейченков А.Н.¹,
Денисенко В.И.¹, Пластун А.Т.¹, Недзельский В.Е.², Бердичевский А.С.²

¹УрФУ имени Первого президента России Б.Н. Ельцин, Екатеринбург, Россия. E-mail: kem_em@mail.ustu.ru

²ЗАО «Уралэлектромаш», Каменск – Уральский, Россия. E-mail: kuemz@mail.ru

Аннотация – В статье рассматривается применение наноструктурированных оксидно-нитридных материалов в качестве наполнителей пропиточного компаунда для повышения КПД и увеличения срока службы асинхронных двигателей путем снижения перегревов обмотки статора.

Ключевые слова – Наноструктурированные оксидно-нитридные материалы, асинхронные двигатели, пропиточные компаунды, теплопроводящие наполнители, экономический эффект

В России потребление электроэнергии электрическими машинами переменного тока составляет более 40% производимой электроэнергии. В связи с этим повышение энергоэффективности машин переменного тока является актуальной задачей.

Одним из путей повышения энергетической эффективности и надежности асинхронных электродвигателей переменного тока является использование в пазах статора клиньев из магнитомягких материалов – «магнитных клиньев» вместо клиньев классического исполнения из немагнитных материалов (например, стеклотекстолитовых клиньев).

Как известно, использование в конструкции асинхронного электродвигателя магнитных клиньев позволяет сформировать магнитное поле определенной конфигурации в межзубцовом пространстве электродвигателя, снизить амплитуды зубцовых гармоник магнитной индукции в воздушном зазоре между ротором и статором, эффективно уменьшить добавочные потери, моменты от высших гармоник магнитного поля, шумы и вибрации магнитного происхождения.

В процессе эксплуатации электрических машин большой мощности установлено, что при установке магнитного клина (например, с использованием железного порошка, стальной сетки или стальных пластин и т.п.) возрастает КПД, снижается температура нагрева обмоток и стали сердечника, существенно улучшаются виброакустические характеристики. Однако, для машин малой и средней мощности до сих пор эти вопросы не решены из-за отсутствия материалов для изготовления магнитного

клина.

Исходя из условий работы, материал магнитных клиньев должен обладать определенными механическими характеристиками при растяжении, изгибе и ударной вязкости. Одновременно магнитная проницаемость клина не должна быть ниже допустимого предела. Обеспечение этих требований возможно только при использовании композиционного материала, где механические усилия воспринимаются армирующей сеткой из стекловолокна.

В качестве магнитопроводного материала для магнитного клина предлагается применять магнетит. Его получение в промышленном масштабе не вызывает каких-либо трудностей, что открывает широкие возможности для его применения.

С другой стороны, частицы магнетита являются концентраторами напряжений в материале, ухудшая его механические характеристики, особенно при достаточно большой концентрации. Эти особенности при разработке состава и структуры материала магнитного клина определили применение магнетита в наносостоянии, что позволяет при требуемой величине магнитной проницаемости обеспечить необходимые механические характеристики материала.

В процессе работы над материалом для магнитного клина и технологией его изготовления было установлено, что для получения армированного трехфазного наноструктурированного композиционного материала необходимо использование нанотехнологии. Такая технология предусматривает анизотропное распределение наноразмерного электромагнитного материала в усиленной полимерной матрице. Применение наночастиц обеспечивает сохранение физико-механических и электро-теплофизических характеристик клинового композиционного материала при требуемом содержании модификатора.

Важной характеристикой магнитопроводного материала является магнитная проницаемость синтезированного порошка магнетита в наносостоянии, которая менее чем на 3% отличается от значения магнитной проницаемости природного магнетита. Введение магнетита в виде наноразмерного порошка обеспечивает требуемую магнитную проницаемость

композита.

В качестве двухфазного композиционного полимерного материала, имеющего матричную структуру и представляющего собой армирующий элемент, использовалась отвержденная смола типа K-153.

Присутствие третьего компонента, который обеспечивает магнитную проницаемость магнитного клина статора электрической машины, является инновационной особенностью предлагаемого композиционного материала.

В технологическом плане вопрос о равномерном распределении наночастиц по объему материала и исключении их агломерации решен введением нанопорошков магнетита в органический растворитель с механическим диспергированием по специально выбранному режиму. Изображение структуры композита, полученное на электронном микроскопе, приведено на рисунке 1, где отчетливо видно, что средний размер наночастиц около 50 нм.

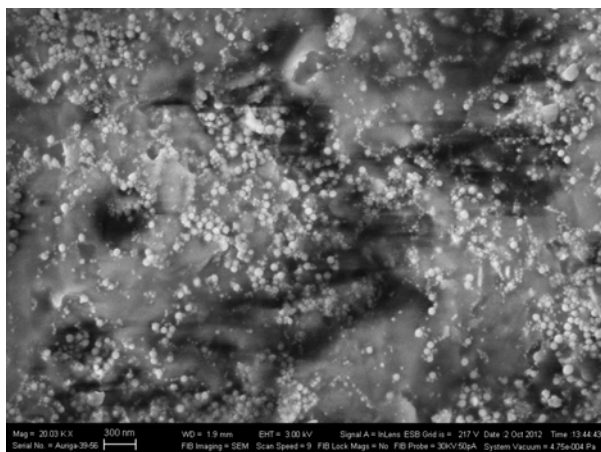


Рис. 1. Структура композита.

В процессе исследований по выбору структуры, состава и технологии получения композиционный материал магнитных клиньев подвергался исследованию электрофизических, механических и физико-химических свойств.

Результаты определения магнитной проницаемости полимеризованного композиционного материала (размер частиц магнетита 50-60 нм) без термомагнитной обработки приведены на рис. 2, где показана зависимость μ от содержания магнетита в наносостоянии.

Как показывают результаты измерений, содержание магнетита не должно быть менее 60 % массы в полимерном связующем.

Для повышения эффективности использования магнитного клина в результате применения термомагнитной обработки композита в процессе термоотверждения удалось создать анизотропию магнитной проницаемости: в поперечном направлении магнитная проницаемость уменьшилась в два раза.

Механические характеристики полимеризованного композита в зависимости от содержания магнетита и его крупности приведены в табл. 1.

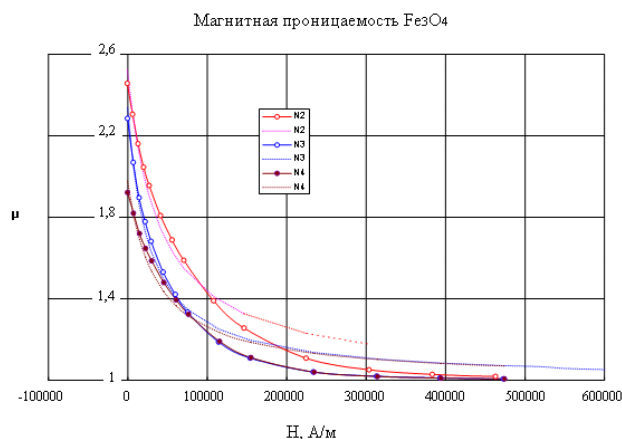


Рис. 2. Зависимость магнитной проницаемости от содержания магнетита: 2 – $1.99 \cdot 10^3$ кг/м³, 3 – $1.25 \cdot 10^3$ кг/м³, 4 – $1.12 \cdot 10^3$ кг/м³.

Для подтверждения работоспособности разработанного материала по стандартным методикам, принятым в электротехнической промышленности, были проведены исследования физико-химических свойств материала на стойкость к маслам, спиртам и подобным растворителям, на теплостойкость.

Теплопроводность композита при оптимальном содержании магнетита превышает теплопроводность пазовой изоляции на 30%.

Таблица 1

Механические характеристики отвержденного композиционного материала

Содержание магнетита, масс. %	Предел прочности на растяжение, МПа	Предел прочности на изгиб, МПа	Ударная вязкость кДж/м ²
d = 3 мкм 0	110	140	12
d = 50 нм	150	180	16
d = 3 мкм 15	120	130	10
d = 50 нм	160	170	14
d = 3 мкм 30	80	110	8
d = 50 нм	104	145	12
d = 3 мкм 60	60	90	6
d = 50 нм	80	117	10

Для опытной проверки выдвинутых предложений на кафедре электрических машин УрФУ совместно с ЗАО «Уралэлектромаш» и кафедрой редких металлов и наноматериалов УрФУ была изготовлена опытная партия пазовых клиньев для электрических машин мощностью 18,5 и 30 кВт.

Для оценки применения магнитных клиньев с

целью повышения эксплуатационных показателей электрических машин была выполнена модернизация асинхронных двигателей типов рДМ180LB4УХЛ мощностью 30 кВт и ДМ180М4У1JM 2081 мощностью 18,5 кВт и проведены испытания опытных образцов двигателей.

Паспортные данные исследованных электродвигателей:

рДМ180LB4УХЛ

полезная мощность – 30 кВт;
 скорость вращения – 1460 об/мин;
 напряжение – 380 В;
 номинальный ток – 66,8 А;
 коэффициент мощности – 0,77;
 КПД – 88,2%.

ДМ180М4У1JM 2081

полезная мощность – 18,5 кВт;
 скорость вращения 1460 об/мин;
 номинальное напряжение – 380 В;
 номинальный ток – 42 А;
 коэффициент мощности – 0,76;
 КПД – 81,8 %.

Двигатели проходили испытания в лаборатории испытаний ЗАО «Уралэлектромаш» в 2 этапа (рис. 3). На первом этапе испытывались стандартные двигатели со стеклотекстолитовыми клиньями. Результаты испытаний в режимах холостого хода, короткого замыкания и номинальной нагрузки приведены в таблицах № 2 и № 5.



Рис. 3. Установка для испытания двигателя 18,5 кВт

Таблица 2

Рабочие характеристики серийного асинхронного двигателя рДМ180LB4УХЛ со стеклотекстолитовыми клиньями

U	I _{ср}	P1	cosφ	P _{м1}	P _{сг}	P _{м2}	P _{мж}	P _{доб}	P _{сум}	P2	КПД	ξ	n
380	74	38800	0,798	1199	771	884	240	194	3288	35512	91,5	2,4	1464
380	70	35800	0,778	1073	771	737	240	179	3000	32800	91,6	2,17	1467
380	66,8	33800	0,77	977	771	641	240	169	2798	31002	91,7	2,0	1470
380	65	32600	0,763	927	771	587	240	163	2688	29914	91,7	1,9	1471
380	60	31000	0,786	778	771	500	240	155	2455	28546	92	1,7	1475

На втором этапе двигатели были разобраны и стеклотекстолитовые клинья были заменены магнитными. Опытные образцы двигателей успешно прошли испытания на проверку электрической прочности витковой и корпусной изоляции, проведенные по стандартной методике. После сборки двигатели были испытаны по стандартной методике (по той же самой программе испытаний в лаборатории испытаний в ЗАО «Уралэлектромаш»). Результаты испытаний двигателя приведены в таблицах №3 и №6.

Таблица 3

Рабочие характеристики опытного асинхронного двигателя с магнитными клиньями для номинального режима

U	I _{ср}	P1	cosφ	P _{м1}	P _{сг}	P _ж	P _{м2}	P _{мж}	P _{доб}	P _{сум}	P2	КПД	ξ	n
220	65	32800	0,762	911	771	30920	587	240	163	2672	29930	91,85	1,85	1472

При расчете рабочих характеристик двигателей рДМ180LB4УХЛ и ДМ180М4У1JM 2081 расчетные температуры обмотки статора были приняты меньшими на величину, равную уменьшению перегрева двигателя с магнитными клиньями по отношению к серийной машине, т.е. на 6 °К и 10,9 °К соответственно (по данным эксперимента). При этом были выравнены постоянные потери двигателей (холостого хода и механические) для более строгого выявления влияния температуры на КПД сравниваемых двигателей (в этом отношении двигатели были поставлены в одинаковые условия). Выдержки из этих таблиц сведены в сравнительную табл. 4.

Как показали результаты испытаний, применение магнитных клиньев приводит к уменьшению тока холостого хода и потерь (главным образом добавочных потерь в стали) и снижению перегрева обмотки статора в номинальном режиме работы двигателя на 6 °К. В результате КПД двигателя рДМ180LB4УХЛ возрастает на 0,15 % по сравнению с КПД серийного двигателя, изготовленного со стеклотекстолитовыми клиньями. Применение магнитного клина в двигателе ДМ180М4У1JM 2081 приводит к дополнительному увеличению КПД на 0,52%.

Таблица 4

Параметры рабочего режима серийного и опытного двигателей мощностью 30 кВт при постоянстве механических и добавочных потерь и потерь в стали

Параметр рабочего режима	Варианты двигателя	
	стеклотекстолитовые клинья	магнитные клинья
Потребляемая мощность, Вт	32600	32600
Потери электрические статора Вт	927	911
Полезная механическая мощность, Вт	29914	29930
Скольжение	1,9	1,85
КПД, %	91,7	91,85

Таблица 5

Рабочие характеристики серийного асинхронного двигателя ДМ180М4У1М 2081 со стеклотекстолитовыми клиньями

U ₁	I _{ср}	P ₁	P _{эл1}	P _{ст}	P _{эл2}	P _{мех}	P _{доб}	P _{сум}	P ₂	КПД	cosφ	S	n
380	48	26000	1438	396	744	150	130	2859	23141	89,01	0,732	3,08	1454
380	45	23800	1264	396	615	150	119	2545	21255	89,31	0,718	2,78	1458
380	42	22400	1101	396	543	150	112	2303	20097	89,72	0,727	2,6	1461
380	40	20800	998	396	479	150	104	2128	18672	89,77	0,709	2,47	1462
380	37	19200	854	396	389	150	96	1886	17314	90,18	0,711	2,17	1467

Таблица 6 – Рабочие характеристики асинхронного двигателя с наноструктурированными магнитными клиньями

U ₁	I _{ср}	P ₁	P _{эл1}	P _{ст}	P _{эл2}	P _{мех}	P _{доб}	P _{сум}	P ₂	КПД	cosφ	S	n
380	49	25600	1433	401	708	150	128	2820	22779	88,98	0,706	2,98	1455
380	45	23600	1209	401	587	150	118	2465	21134	89,55	0,714	2,67	1460
380	42	22000	1053	401	514	150	110	2227	19772	89,87	0,715	2,5	1463
380	41	20800	1004	401	456	150	104	2115	18685	89,83	0,692	2,35	1464
380	38	19200	862	401	377	150	96	1886	17314	90,18	0,692	2,1	1468

ВЫВОДЫ

Таким образом, выполненные авторами исследования показали, что применение магнитных клиньев вместо традиционных стеклотекстолитовых приводит к снижению нагрева обмотки статора и увеличению КПД асинхронных двигателей.

Результаты заводских испытаний подтвердили целесообразность использования магнитных клиньев, изготовленных из полимеризованного композита при производстве асинхронных двигателей с полужакрытыми пазами мощностью до 100 кВт.